

基于多线程改进的动态规划算法在杆塔排位中的应用研究及实现

陈璐瑶¹ 郭建东¹ 黄昱嘉² 邱培霖¹ 代梓含¹

(1 电子科技大学 信息与软件工程学院 四川成都 611731 2 四川电力设计咨询有限责任公司 四川成都 610000)

摘要: 随着科技飞速发展,电力系统采用计算机进行高压输电线路设计,显著提升了工作效率和经济效益。鉴于杆塔排位环节涉及众多复杂因素,且任一因素的变动(如立塔点、塔型或塔高)均会导致全新排位方案的产生,如何选择最优方案成为挑战。本研究旨在最小化目标输电线路杆塔的总重量与造价成本,为此,详细阐述了动态规划算法,并构建了适用于多约束单目标问题的模型。然而,鉴于传统动态规划算法面临较大的时间开销,本研究采用多线程技术对其进行改进,提出了一种既准确又高效的优化方法。结果显示,相较于人工排位,采用本研究方法所得到的线路杆塔总重量显著降低;同时,在时间成本上,该方法也远低于传统动态规划算法。

关键词: 杆塔排位; 动态规划; 多约束单目标问题

0 引言

随着国家经济建设的蓬勃发展,计算机与网络技术日新月异,为电力系统设计的信息化、智能化转型提供了前所未有的机遇与挑战^[1]。在输电线路设计的众多环节中,杆塔排位作为核心要素之一,其优化程度直接关系到工程的经济性、施工难度及整体效能。鉴于排杆定位涉及复杂的逻辑推断与多变量决策,其过程充满不确定性且难以仅凭经验有效控制。

人工排杆定位方法高度依赖经验判断,虽能通过模板与技术条件校验确保技术可行性,但在成本控制方面却显得力不从心。本研究将杆塔排位问题视为一个多约束离散优化决策过程,详细介绍传统动态规划方法的实现过程,利用计算机程序实现排位的自动化与智能化,使杆塔排位工作得以数字化处理。

然而,该方法虽大大优化了成本,但计算时间过长,无法高效开发。鉴于此,本文基于多线程,对传统动态规划进行改进。旨在从海量排位方案中精准筛选出既经济又技术合理的最优解,为输电线路设计提供科学、高效的设计方案。

1 相关工作

1.1 弧垂

在输电线路杆塔排位过程中,通过计算电线的弧垂以确定电线在档内各点的位置,从而校验电线各点对地面及地面设施的距离。

两塔间弧垂的计算公式如式 1:

$$f = 4KL_1L_2 \#(1)$$

在公式 1 中, f 代表档距弧垂, k 取 0.00008, L_1 为距离第一个塔的水平距离, L_2 为距离第二个塔的水平距离。

1.2 水平档距和垂直档距^[2]

任何一杆塔和其它相互连接杆塔之间的水平档距和垂直档距必须小于这个杆塔能够承受的最大水平档距和最大垂直档距。

水平档距计算公式如式 2:

$$l_H = \frac{l_1 + l_2}{2} \#(2)$$

在公式 2 中, l_H 代表水平档距, 单位 m; l_1, l_2 分别为杆塔两侧的档距, 单位 m。

耐张塔的垂直档距计算公式如式 3:

$$l_v = l_{1v} + l_{2v} = \left(\frac{l_1}{2} + \frac{\sigma_{10}h_1}{\gamma_v l_1} \right) + \left(\frac{l_2}{2} + \frac{\sigma_{20}h_2}{\gamma_v l_2} \right) \#(3)$$

当为直线杆塔时, $\sigma_{10} = \sigma_{20} = \sigma_0$, 公式如式 4:

$$l_v = \frac{l_1 + l_2}{2} + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \left(\frac{h_1}{l_1} + \frac{h_2}{l_2} \right) \#(4)$$

$$= l_H + \frac{\sigma_0}{\gamma_v} \alpha$$

在公式 3 和 4 中,

l_{1v}, l_{2v} : 分别为某一杆塔两侧的垂直档距, m;

σ_{10}, σ_{20} : 分别为某一杆塔两侧的电线的水平应力, N/mm²;

α : 杆塔的综合高差系数;

l_1, l_2, l_H : 分别为杆塔两侧的档距和杆塔的水平档距,

m;

h_1, h_2 : 分别为杆塔两侧的悬挂点高差(m), 当邻塔悬挂点低时取正号, 反之取负号;

σ_0 : 耐张段内的电线水平应力(N/mm²);

γ_v : 电线的垂直比载, N/m*mm²。

2 传统动态规划算法的实现

在输电线路的杆塔排位优化问题中, 核心目标是在给定的选线线路上, 通过合理选择立塔点及相应的杆塔塔型, 最小化整条线路的工程造价。

我们将目标耐张段 S 中的连续路线进行离散化处理。通过均匀采点的方式, 将其划分为一系列具有代表性的采样点, 这些采样点构成了一个集合, 记为 P_{area} ,

$P_{area}=\{P_i|i=1,2,\dots,T\}$ 。

在实际工程中,输电线路的架设往往受到多种自然与人为因素的制约。针对这一问题,我们进一步在采样点集合 P_{area} 中筛选出那些不适宜立塔的点位和区域,并将其从集合中剔除。该限制条件如图 1 所示,记为 P_{fbd} 。

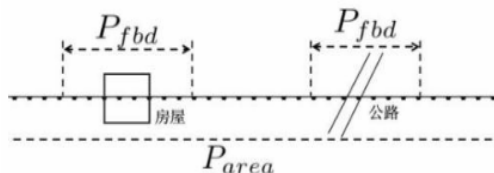


图 1 立塔限制区

Fig. 1 Feasible areas And Restricted areas

通过公式 5 可求出该耐张段的所有可立塔点:

$$p_i \in P_{area}, p_j \notin P_{fbd} \quad (5)$$

经过上述预处理后,剩余的采样点构成可立塔点的集合 P_{allow} , $P_{allow} = \{P_i|i = 1, 2, \dots, n\}$ 。而杆塔排位的过程就是从 P_{allow} 中选择出塔位子集 P_{tower} , 在 P_{tower} 的塔位上确定塔型及其高度使输电线路的架设成本值 $\sum V(p_i, t_i, h_k)$ 最小, 如公式 6 所示。 t_i 是 P_i 处的杆塔类型, $t_i \in T_{tower}$, T_{tower} 是工程提供的可选杆塔种类, h 是杆塔高度。 $V(P_i, t_i, h)$ 是在 P_i 处立杆塔 t_i 的成本。

$$W = \min \left(\sum_{p_j \in P_{allow}, t_i \in T_{tower}, h_k \in H} V(p_j, t_i, h_k) \right) \quad (6)$$

该目标函数的解空间是 $P_{allow} \times T_{tower} \times H$ 的三维空间, 维度为 $n \times m \times k$ 。由此可见, 杆塔排位过程的本质就是从解空间中寻找成本最小的最优解^[7]。

我们假设 $W(p_i, t_i, h_k)$ 为 p_i 摆放 t_i 类型的高度为 h_k 的塔时, 从起点 p_1 到 p_i 处输电线路摆放杆塔的最低成本。若计算到当前位置 p_n 所需的成本值, 则从起点 p_1 到当前点 p_n 的最低架设成本就是在该点处的杆塔成本 $V(p_i, t_i, h_k)$ 与该点前所有立塔成本最低值之和 $\min(W(p_i, t_i, h_k))$, 可归纳为状态转移方程如式 7:

$$\begin{aligned} W(p_1, t_1, h_k) &= V(p_1, t_1, h_k), t_i \in T_{tower}, h_k \in H \\ W(p_n, t_n, h_k) &= \min(W(p_j, t_j, h_k)) + V(p_n, t_n, h_k), \quad (7) \\ n &= 2, 3, \dots, M; j = 1, 2, \dots, n-1; \\ t_i, t_m &\in T_{tower}, h_k \in H, h_l \in H_m \end{aligned}$$

通过从起点位置一直到终点位置迭代反复应用该方程式, 输出相应的塔位集合和杆塔集合, 得到最优排位方案^[3-4]。具体的算法流程如下:

(1) 根据输入的山体断面数据和电气专业相关约束条件, 得到 P_{allow}, T_{tower} ;

(2) 初始化 $W(p_n, t_i, h_k)$ 的成本值为 ∞ , 初始化起始位置 p_1 成本值 W 为 0。初始化 DP 表, 用于存储到达每个

位置时的最小成本;

(3) 从 p_2 开始排位, 进行动态规划迭代。遍历每一个可行塔位 p_n , $p_n \in P_{allow}$, 每种塔类型 t_m , 和该塔高度范围 h_k 。记该点所立杆塔为三元组 (p_n, t_m, h_k) 。

(4) 找到当前杆塔 (p_n, t_m, h_k) 前一个塔的三元组信息 (p_i, t_i, h_k) : 遍历所有之前的位置 p_i 、塔类型 t_i 和塔高 h_k , 并检查是否满足所有约束条件^[5]。

(5) 如果满足约束, 则更新 $dp[n][m][l]$ 为从起始点到前一个塔的最小总成本加上当前塔的成本, 即 $W(p_n, t_m, h_k) = \min(W(p_i, t_i, h_k)) + V(p_n, t_m, h_k)$ ^[6]。

(6) 找到 $dp[n]$ 中的最小值, 即最后一座塔放置时的最小成本;

(7) 从最小值开始回溯, 寻找达到最小成本所选择的塔位置、类型和高度。

3 基于多线程并行计算的改进与实现

运用传统动态规划进行杆塔排位时, 往往会因为计算量过大而导致时间开销大。例如, 一条输电线路有 65km, 若每隔 10 米取一采样点, 将有 65000 个点位; 杆塔的类型有 5 种, 杆塔的高度能取大约 30 种不同的值, 计算时间将非常长。

由于耐张塔位置的确定, 我们可将一条线路分为若干个耐张段, 每个耐张段单独处理。这样大大缩短了运行时长, 且得出的排位结果差异不大^[8]。多线程并行计算的流程图如图 2 所示:

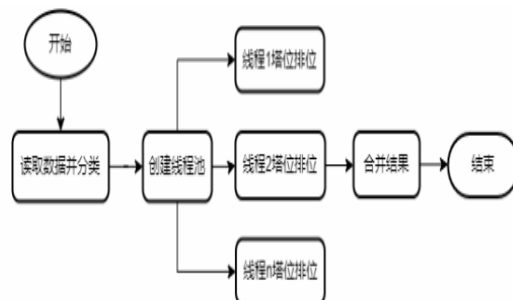


图 2 多线程并行计算流程图

Fig.2 Flow chart of multithreaded parallel computation
具体流程如下:

(1) 数据准备阶段:

从加载指定的断面数据文本文件中, 得到多个数据集。将断面数据进行分类处理, 按耐张段段号分为 N 个耐张段, 存储在字典中, 每个耐张段单独进行排位。

(2) 任务分配与并行处理:

创建线程池。遍历字典中的每个部分, 将每个耐张段和对应的数据传递给杆塔排位算法函数进行处理, 同时将该任务提交给线程池。每个线程独立运行动态规划算法, 处理给定的断面数据, 并生成相应的处理结果。

(3) 结果收集阶段:

按任务完成顺序收集每个线程的处理结果。每个线

程完成后，将其处理的结果收集到结果列表中。

(4) 后续处理阶段：

将所有处理结果合并，生成直线塔列表，其中每个线程处理的结果以记录的形式加入。

4 结果分析

本文对相同断面数据和相同杆塔类型分别进行人工排位、传统动态规划排位和改进排位，通过分析和比较并结合工程设计的应用情况，得出结论如下：

(1) 对传统动态规划排位方法和改进方法分别进行了编程，以测试两种方法的运行时间。

基于 Windows11 系统，python3.11 进行编译，对某市南的断面数据进行杆塔排位，三种方法所需时间如表 1：

表 1 三种方法所用时间

Table 1 Times of three methods

人工排位	传统动态规划	改进后的动态规划
30~60min	5h+	87min

一般来说，人工排位所需时间不确定，与地形难度和经验有关。而改进后的动态规划算法所需时间远远低于传统动态规划。

(2) 对于排位结果总重量的统计， $W(\text{人工排位}) > W(\text{改进后的动态规划}) > W(\text{传统动态规划})$ ， W 指整条输电线路的直线塔与耐张塔的重量之和。人工排位主要根据经验逐个排位，能保证结果可行性，但难以找到最优解。传统动态规划和改进后的动态规划总重量远低于人工排位结果，且符合在多约束条件下的最优解。

(3) 对杆塔排位结果进行可视化处理。运用 PyQtGraph 库，将输入的断面数据文本文件转化为可视化断面进行查看。如图 3 所示，折线为中线、左线和右线，竖线为转角塔位置，矩形为房屋，同时横坐标展示了耐张段、转角塔度数及档距等。

(4) 通过改进后的动态规划算法进行排位后，也能展示杆塔排位结果和约束条件，如图 4 所示：

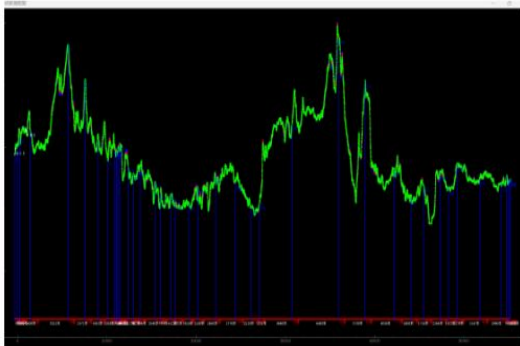


图 3 断面图

Fig. 3 Cross-section map

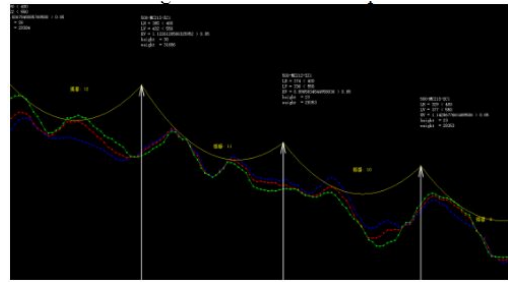


图 4 杆塔排位结果展示

Fig. 4 Display of pole and tower alignment results

参考文献：

- [1]唐波, 孟遂民, 郑维权. 架空输电线路设计[M]. 第三版. 中国电力出版社, 2024.
- [2]邵天晓. 架空送电线路的电力学计算[M]. 第二版. 中国电力出版社, 2003.
- [3]D. Ding, H. Guo, L. Huang and Y. Wang, "Multi-objective optimization of reentry trajectory for Hypersonic Gliding Vehicle," 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), Nanjing, China, 2016, pp. 1436-1443.
- [4]张国良. 快速实现输电线路杆塔排位优化的方法[J]. 电力建设, 2008, 29(5): 40-42.
- [5]许少淦. 架空送电线路自动优化排位程序的应用[J]. 电工技术, 2007(7): 9-10.
- [6]Y. Lin, "Excitation control system based on multi-objective Heuristic Dynamic Programming," 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference, Wuhan, China, 2011, pp. 348-353.
- [7]汤秋丽, 李子扬, 马芳, 等. 基于非线性多元回归分析的输电线路铁塔塔重计算[J]. 国网技术学院学报, 2013, 16(6): 20-24. 1-4.
- [8]李丙春. 基于遗传算法和 Python 多处理器并行计算的二阶热传导方程初边值问题数值解法[J]. 喀什大学学报, 2020, 41(6): 53-56.
- 陈璐瑶, 女 (出生 2001.05), 汉族, 四川省宜宾市, 硕士研究生, 研究方向: 软件工程, 动态规划, 杆塔排位
- 郭建东, 男 (出生 1967.08), 汉族, 天津市, 研究生, 职称: 副教授, 研究方向: 软件工程, 智能工程, 模式识别及算法
- 黄昱嘉, 男, (出生 1996.08), 民族汉, 四川省内江市, 硕士研究生, 研究方向: 工程数字化
- 邱培霖, 男 (出生 2001.07), 汉族, 重庆市渝北区, 硕士研究生, 研究方向: 软件工程
- 代梓含, 女 (出生 2001.12), 苗族, 重庆市彭水县, 硕士研究生, 研究方向: 软件工程